

王绍武◎编著

# 全新世 气候变化

The Holocene  
Climate Change

 气象出版社  
China Meteorological Press

# 全新世气候变化

王绍武 编著

## 内容简介

对全新世气候变化作了系统的阐述。共分六章:地球气候简史,全新世气候,气候突变,近千年气候变化,现代气候变暖,气候变化与古文明。总结归纳了近 20 年气候变化研究的成果。重点讲述各种时间尺度全球气候变化的事实,也包括中国气候变化的事实。全书以分析自然气候变化为主。但是,第 5 章专门讨论现代气候变暖,这个变暖可能主要是人类活动造成的温室效应加剧的结果。气候变化对人类社会的影响是深远的,这方面的研究对预测未来气候变暖的影响有重要意义。第 1 章 1.4 节和第 6 章讲述全新世气候变化、主要是自然气候变化对人类社会发展的影响。本书可供大专院校气候、气象、地理、地质、环境等专业的大学本科生和研究生阅读,也可供有关专业研究及教学人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

全新世气候变化/王绍武编著. —北京:气象出版社,2011.9

ISBN 978-7-5029-5297-6

I. ①全… II. ①王… III. ①全新世-气候变化-研究

IV. ①P532

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 192815 号

---

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇

封面设计:博雅思企划

责任校对:永 通

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:880 mm×1230 mm 1/16

字 数:610 千字

版 次:2011 年 10 月第 1 版

定 价:88.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68406961

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:18.5

印 数:1~3000 册

印 次:2011 年 10 月第 1 次印刷

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

## 序 一

经过多年的潜心研究和精心准备,王绍武教授的专著《全新世气候变化》即将面世出版了。作为学生、朋友和气候变化科学的志同道合者,谨向王绍武教授表示热烈的祝贺!

一个多月前,王老师将初稿打印件交给我,厚厚的一本,是他辛勤耕耘的硕果。“里面一定有我需要补充的营养”,我心里想着,非常喜悦,只希望能先睹为快。不料,接着王老师诚恳地说,希望我能为他的新作作序,真是感到了压力!王老师还几次,或当面,或通过邮件,说“我总不愿意占用您的时间太多”,我真的感到了友谊、信任 and 爱护。

最近二三十年,学科综合和交叉,包括自然科学和社会科学的交融,人类对自然和社会可持续发展的认识更加深入,人与自然和谐相处、协调发展已经成为时代的谐音。同时,气候变化科学的内涵也大大拓展。现代意义上的气候变化科学,既包括了气候系统科学在内的自然科学,还囊括了经济学、可持续发展等社会科学的内容,其结论还与气候外交谈判紧密关联。学科交叉、高度综合,科学家重视、决策者关注、全社会关心,使 IPCC 2007 年发布的第四次评估报告,吸引了更多人的眼球。气候变化科学和应对气候变化问题被推到了社会前台,受到极大关注!一时间议论纷纷,众说纷纭。但是,气候变化的基础毕竟是科学,需要科研、教育和科普工作的跟进,需要业内专家的努力,还需要时间和精力。此时王老师的专著问世,对科学、教育和普及气候变化知识非常及时,大有裨益。

我很推崇本书的写作风格:提纲挈领、简明扼要介绍行星地球演化历史后,旋即转入全新世气候、气候突变和近千年气候变化的论述,重点阐述了中世纪暖期和小冰期两个百年尺度的气候变化,因为他们“对认识与预测未来的气候变化有重要意义”;本书接着论述“现代气候变暖”这一仍具“争议”的问题。这种编排方式,第一,强调了气候变化科学的“时空尺度”属性。在空间尺度上,作者将全球、区域和局地尺度上的气候变化划分开来;在时间尺度上,按  $10^5 \sim 10^0$  年的时间序列展开讨论。第二,将空间和时间尺度有机结合,系统阐述全球、区域和局地等空间尺度上的不同时间尺度气候变化,科学有序,论述清晰明了。

作者对 46 亿年的地球演化史,用“厚今薄古”的方法,阐述从隐生宙到显生宙、从古生代到中生代,超长时间(百万年—千万年)尺度的地球演化梗概。对第三纪和第四纪花了较多笔墨,介绍了轨道因素的 10 万年和 4.1 万年气候旋回,指出目前的间冰期——全新世已持续 11500 年,按气候自然变率,现在该进入下一个冰期。但是,为什么全球气候没有变冷反而继续变暖呢?作者给读者留下一个悬念,也为后文的现代气候变暖作了铺垫。对于世界各地的末次冰期冰盛期、冰消期和全新世大暖期,作者认为“不同地区达到最冷的时间也不同”,“不同地区大暖期出现的时间也不一样”,讲的是这个时间尺度上气候变化存在着空间差异。对千年尺度的气候变化,由于资料采集站点的地理分布和代用资料本身的性质及相互可比性仍存在问题,已建立的序列还有不少分歧,就是在中国,大暖期和小冰期也有很大的地区差异。全新世一万年只是地球历史的一瞬,却是一个重要时段。18 世纪中叶人类社会工业化以来,人类活动和科技进步影响了全球气候,而气候变化也制约人类社会的发展。

研究表明,近百年来全球气候变暖是不争的事实,自然因素和人类活动共同影响地球气候,但近百年的全球气候变暖主要归因于人类活动,已建立的近百年全球地表平均温度(1910—2009年)变暖趋势为 $0.70\sim 0.75^{\circ}\text{C}/(100\text{年})$ 。

综上所述,可以清楚地看到,本书将时间和空间的概念融入到不同空间和时间尺度气候变化的讨论中,在几乎所有的小结结论中,都有明确的时空条件,否则,结论不成立。这一点恰恰是许多人容易忽略的地方。须知,无论是整个地球历史时期,还是全新世、乃至现代,不同的时期,气候资料的来源、数量、覆盖度、精度、观测方式,气候代用指标的性质,等等,差别很大。只有近百年以来,器测和气象站记录的出现,平均气候、距平和差值技术的使用,世界范围内才有了三个公认的百年尺度全球平均温度序列。其结果虽然有不尽人意之处,但毕竟是科学界公认的结果,不足的地方也只有待进一步的研究来弥补。说明白一点,就是在全局尺度和 $10^1\sim 10^2$ 年的尺度下,比这三条曲线更完美的全球平均温度序列还需时日。

王绍武教授引用了大量的资料,丰富的数据和例证,给读者描绘了一幅一万年以来,地球气候环境演化的图画。虽然王老师个人强调,该书“主要讨论自然气候变化”,但由于对古气候资料时空尺度恰到好处的把握,有关现代气候变暖的结论很具有说服力,虽然王老师对未来出现太阳活动极小期的可能性也有考虑。所以我说,王绍武教授的大作在这个时候问世,对科学研究,对专业教育和普及气候变化科学知识,非常及时,大有裨益。

气候变化科学内容广泛,发展迅速。王绍武教授密切关注国内外气候变化研究进展,查阅并引用了最新研究成果。本专著引用的863篇文献,中文的占四分之一;60%以上的是2000年后的文献,55篇是去年和今年的新成果,说明本专著反映了气候变化科学的最新成果。

我和王绍武老师结识近20年了,交往很多。他长期担任我们“冰芯与寒区环境实验室”(现“冰冻圈科学国家重点实验室”)的学术委员会委员,是IPCC第一工作组的主要作者,是气候变化国家报告和中国气候与环境演变科学报告的主要作者,还是《气候变化研究进展》杂志编委,等等,我们长期共事,成为科学研究的志同道合者。他是近十几年国内有关气候环境变化科学评估报告的积极参加者,是《气候变化研究进展》杂志创刊以来参加编委会全部会议的唯一编委。在我的记忆里,他的认真态度,他的一丝不苟,兢兢业业、埋头苦干和钻研,是我最为推崇的和敬仰的。

现在,工作和兴趣的驱使,倾注王老师几乎全部心血的专著即将问世。我很荣幸地被邀请作序,同时也成为专著问世前的拜读者之一,在此,对王绍武教授表示祝贺和感谢,是为序。

中国气象局,中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室

秦大河\*

2011年9月13日,北京

\* 秦大河,第十一届全国政协人口资源环境委员会副主任,中国科学院院士,前中国气象局局长。

## 序 二

今年7月在瑞士参加第18届国际第四纪大会时,收到王绍武老师的同事小闻的邮件,说王老师写了一本书《全新世气候变化》,想邀我写个“序”。这把我难住了,学生晚辈为老师的书写“序”似乎不太合乎中国的习惯,且我的文笔写篇科学论文还行,怎敢给老师的书写“序”呢。回国后,收到王老师的书稿和一封亲笔信,王老师说邀我写“序”的一个原因是我这些年一直鼓励他将《气候变化研究进展》杂志的“科学知识”栏目上介绍气候变化的系列短文写下去。我真没想到,王老师这样一位著名的学者如此重视一位晚辈对他工作的关注和支持。我的确没有理由谢绝这一邀请了,难得两代学人之间有如此的信任和在研究兴趣与学术追求上的共鸣。

厚厚的A4纸装订的书稿:《全新世气候变化》,使人感到朴素、严肃,又感到亲切。全书分为六章,近三百页,随后有八百多篇参考文献,英文文献占约80%。

第1章“地球气候简史”,涉及不同时间尺度的地球气候历史,提供了相关研究的框架和基本概念。这一章是为后五章做铺垫的,也是最后撰写的。本章的最后一节是“气候与人类”,这为后面几章论述气候变化对环境、社会和人类的影响打下了伏笔,便于不同背景的读者更好地理解本书的内容。第2章“全新世气候”全面介绍了全新世作为现代间冰期的气候特点,其演化背景及变化趋势,其中有相当的篇幅讨论全新世夏季风。在对北美、南美、北非、南非、亚洲及澳洲—印尼等六个季风区进行详细论述之前,简要介绍了全球季风这一较新的现代气候学的概念。第3章至第5章论述了全新世三个不同时间尺度的气候变化,包括以若干冷事件为特征的气候突变(第3章);基于不同资料的、不同区域的近千年气温变化,夏季风与降水变化,对不同地区“中世纪气候异常”(包含中世纪温暖期)成因的探讨(第4章);以及对近百年或20世纪以来全球“现代”气候变暖的观测事实和可能控制因素的分析(第5章)。第6章从圣经中描述的大洪水讲起,介绍了全球气候变化与世界古文明衰落的相关研究。本章的后一部分集中讨论了与中华文明诞生及朝代交替相关的气候变化,这是王老师前些年的研究兴趣,也是现在很热门的话题。

当读到第6章后一部分的时候,我不禁想到王老师在2005年《气候变化研究进展》发刊期上撰写的“夏朝立国前后的气候突变与中华文明的诞生”一文以及对我本人研究的启发。记得他专程来与我们第四纪研究小组的部分同事探讨相关问题,并将他精心制作的报告幻灯片留给我们。朝代更替的研究一直属于考古学家和史学家们的传统领域,近年来,气候变化对历史上改朝换代或者文化兴亡影响的研究促进了社会科学家与自然科学家的结合,国际上最具影响力的杂志刊出了一些相关文章,也引发了一系列极有启发的学术争论。在短时间尺度上,诸如夏季风降水增减的气候变化恐怕难以同时在全国范围内产生同样的影响。从近年国内外的有关讨论来看,朝代兴衰、更替这一考古学家与史学家们关心多年的重大问题不会轻而易举地被自然科学家们解决,需要不同领域的学者们对特定时段的气候变化、环境背景、政治格局、经济形态、文化基础等高度复杂的社会生态系统进行综

合研究。

王老师在本书的前言中说,他写作这本书与他在《气候变化研究进展》“科学知识”栏目上发表相关的短文有关。的确,读着这本书稿,我仿佛又看到了那些短文的写作风格:准确、规范地引用最新文献,由浅入深地解释基本概念和原理。以前的短文很少配图,本书加入了精美的彩图。我脑海里浮现出一幕定格:一位老者带着老花镜在台式计算机面前聚精会神地查阅最新的文献。一位退休多年的著名学者,如此认真地从浩瀚的原始文献中亲自筛选资料,实在是太可贵了,真的令人敬佩。按王老师在本书“后记”里的话,这是一种享受。愿当今有更多的科学家像王老师这样写书,这样享受。

我读王老师和他的同事的文章,但是与王老师见面的机会并不多,而见面时主要话题一是与我们共同关注的古海洋研究有关,二是全新世气候变化与文明演进的关系,以及用区域模式进行这一时期的古气候模拟。印象最深的一次早期见面是2000年9月,在罗勇博士的帮助下,我们把英国剑桥大学教授 N. J. Shackleton(沙克尔顿)爵士在京的第二场学术报告作为气候变化科学前沿论坛系列报告之六十七安排在国家气候中心三楼学术厅,王老师也参加了,这大概是我1999年回北大工作后第一次见到王老师。最近一次与王老师见面又是在北大校园之外的学术报告会上。这是今年7月底,美国哥伦比亚大学 Wally Broecker(布罗克)教授在中国科学院地质与地球物理研究所二楼会议室做报告。有趣的是,这两次报告有个共同点,两位来访的大师在报告会结束时都对报告后的提问表示异常满意(他们是不会讲客套话的!)。我注意到王老师在会下也与他们谈得十分投机,我不知道他们具体讨论的是什么,我猜想王老师可能是在和他们探讨那些他在研读文献时思考的高深学术问题。两个报告会相隔11年,王老师对学术前沿的兴趣丝毫没有减退,我想这就是为什么他能写出我们面前这本书的原因之一吧。

愿《全新世气候变化》早日出版,使更多的人能分享到这份学术盛餐。作为一名不到十年就要退休的大学教师,我也衷心希望王老师的这本书能激起更多的有理想、有能力的年轻人对长时间尺度气候变化研究的兴趣,并加入到这一充满挑战性的、涉及多学科的探索中来。

周力平

北京大学“长江学者”特聘教授

2011年8月

## 前 言

谈到这本书的缘起,可以追溯到 30 年前,1970 年代末到 1980 年代初社会开放、经济改革,学术界也充满了新思潮。但是,一时间很难区分什么是科学?什么是幻想?记得《北京晚报》上连载了一部小说,讲的是过去闪电把人影录制到故宫的墙壁上,现代有一天闪电与过去的频率(什么频率也不知道)相同时,人影就再现在宫墙上。类似的事情还很多,自己当时是怀着学习新鲜事物,打开思路的心情来读这些小说的。另外也有一些问题是当前科学上未能解释的,像土耳其皇宫的古地图中有南极的地形图,大西洋是否有亚特兰蒂斯等,看了之后总是疑信参半。在经过了大约十多年的彷徨之后,一个偶然的的机会龚道溢教授,他当时在北京大学作博士后,给我复印了两篇 PNAS(美国科学院院刊)文章,那时下载文章还很不方便,复印的也模模糊糊,页边上还有字不清楚。但是,至今我还保存着这两篇论文,上面有阅读时密密麻麻的批语及标注的生词。那是讲热盐环流(THC)与北大西洋冷事件的论文。我从这里就开始进入了研究气候突变的领域。特别是后来发现古文明与气候突变有联系,就把业务工作(气候研究)与个人的爱好(历史)连在一起了。这样近十年来就全心全意地投入了全新世古气候的研究中,把过去喜欢的 ENSO 研究、气候诊断、与气候预测都放到一边去了。

在研究全新世气候变化的过程中,总觉得缺少一本系统地讲述气候变化事实的书,因此大约 3~4 年前就想做些准备,开始在《气候变化研究进展》刊物上写一些“科学知识”的短文。每篇短文讲一个问题,加上文献约三千字。想有朝一日要写一本书时有一个大纲,转眼间,从 2007 年到 2011 年五年来已经发表了 20 多篇这样的短文,现在手中还有十来个题目,或者已经写出来了,或者已经酝酿成熟了。这确实就给本书的编写打下了一定的基础。

但是究竟要写成一本什么样的气候变化书呢?这关系到两个基本问题;写什么与谁来写。气候变化是一个覆盖面十分宽广的学科,例如 Roberts 的《全新世》(1989),Williams 的《第四纪环境》(1993),Saltzman 的《古气候动力学》(2002)均各有自己的侧重点,内容几乎很少交叉。《全新世》的副标题为“环境的历史”,自然讲环境为主,《第四纪环境》虽然题目同为环境但讲更新世为主,《古气候动力学》的副标题为“全球气候变化的理论基础”,全书 95% 以上的内容是用数学、物理的工具阐述气候变化的理论。这就告诉我们,鉴于气候学内容的广泛,要编写一本涵盖气候变化研究的各个方面的书是不现实的,也几乎是不可能的。因此,我们紧紧的抓住气候变化事实这个目标。章、节的设计首先都是为了弄清楚气候变化的事实。同时气候变化对人类社会的影响也是作者十分感兴趣的一个方面,因此也算作本书的一个特点。因此,本书定名为《全新世气候变化》,主要讨论自然气候变化,很少涉及人类活动对气候及环境的影响。此外,古气候模拟、预估、理论等气候变化研究的分支也大多不在本书讨论的范围之内。下面一个问题就是谁来写。Mackay 等曾主编了《全新世全球变化》(2003)一书,41 位作者编写了 29 章书,每章一般只有 1~2 位作者。这样编写



的好处是各位撰稿人都是这方面的专家,因此能反映最新的科学信息与较高的综合水平。但是,每一章是一个独立的单位,全书缺少更紧密的联系。有鉴于此,我们采取了另一种做法,就是由一个人编写,但是尽力压缩本书所涉及的范围。这就是为什么本书只着重写气候变化事实的原因。

本书第1章讲地球的历史,自然重点是气候史,但是也讲到一些与气候有关的地球历史上的大问题,如生物大灭绝、人类的起源和走出非洲等。讲到全新世,却只给出一个十分简要的大纲,因为下面几章讲的几乎全都是全新世内的气候变化问题。第2章讲全新世即11.5 ka 以来的气候变化,重点是大暖期与非洲湿润期。第3章讲气候突变。因为这是全新世气候变化的另一个重要特征。第4章讲近千年的气候变化。因为近千年是一个重要的时段。这期间发生了中世纪暖期与小冰期,这是距离现代最近的两个气候特征十分明确的时期。研究这两个时期的气候变化,对认识与预测未来的气候变化有重要意义。第5章讲现代气候变暖问题。这是当今气候学中最重要也是最具有争议的问题。我们基本上同意 IPCC 的观点,即人类活动造成的温室效应加剧是现代气候变暖的主要原因。但是,同时认为自然因素,如太阳活动变化对气候变化的影响也十分值得关注。第6章讲气候变化对古文明及社会发展,如朝代更替的影响。

在本书的写作过程中得到朱锦红博士的大力支持,我不止一次地同她讨论了编写大纲。她是本书的第一位读者,每写一章都发给她请她提出宝贵的意见。又承她多次从国外下载国内找不到的文献。第6章诺亚方舟一小节就是她提供的资料。杨保研究员、郑景云研究员、闻新宇博士、黄建斌博士帮助下载了不少文章。闻新宇博士翻译了图中的英文,还帮我写了一小节“雪球”。古气候不是我的专业,秦大河院士、刘征宇教授、程海博士和我进行了不少深入的讨论,对编写本书有很大帮助。最后,赵宗慈教授在百忙中阅读了全文,她对每一章都仔细地阅读,提出上百条意见,这对保证本书的质量起了重要的作用。陈振华老师承担了本书全部文字录入。对于她们和他们的支持在这里表示深切的谢意。气象出版社李太宇编审、周诗健编审为本书的出版做了很多工作,这里特别感谢他们的支持。

上面提到,本书的部分思想曾作为“科学知识”在《气候变化研究进展》上发表,在此对主编秦大河及编辑部的全体人员表示感谢,并特别感谢秦大河院士一向对我的工作的支持。北京大学周力平教授曾多次鼓励我把“科学知识”的栏目继续下去。所以请他们二人为本书作序,以此纪念多年来的友谊。

本书是在“973”计划“过去2000年全球典型暖期的形成机制及其影响研究”项目(2010CB950104)和中国科学院战略先导项目(9-XDA05090104)支持下出版的,为此对项目负责人葛全胜教授、课题负责人杨保研究员、郑景云研究员表示深切的谢意。

王绍武\*

2011年于北京大学蓝旗营

\* 王绍武,北京大学物理学院大气与海洋科学系教授,swwang@pku.edu.cn

## 目 录

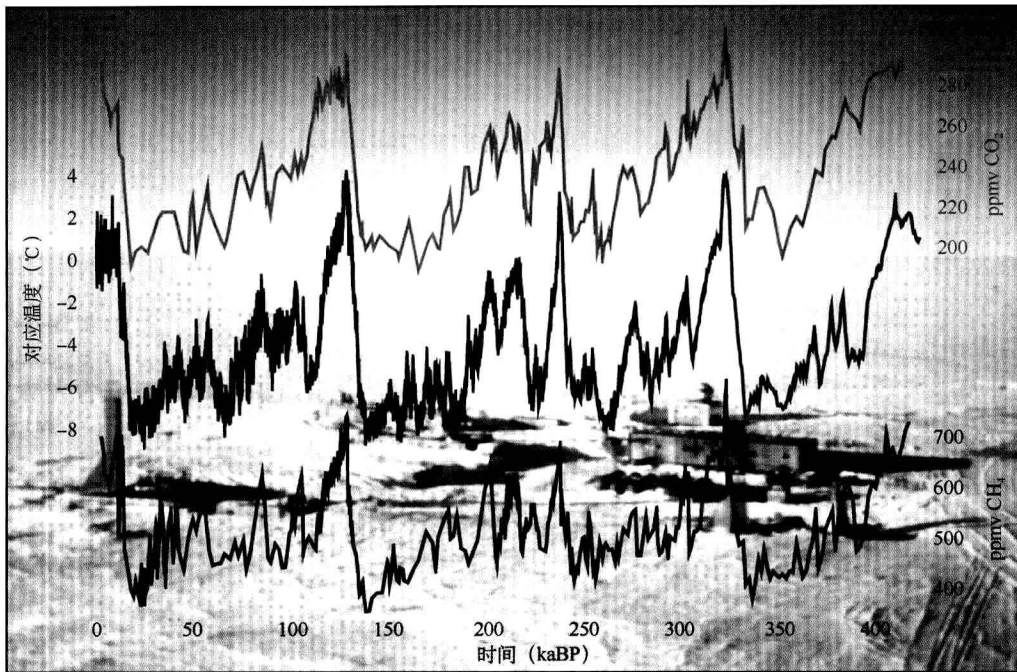
序一 .....	秦大河
序二 .....	周力平
前言 .....	王绍武
<b>第 1 章 地球气候简史</b> .....	( 1 )
1.1 地球的变化 .....	( 2 )
1.1.1 地球史年代学 .....	( 2 )
1.1.2 冰河时代、雪球 .....	( 3 )
1.1.3 生物大灭绝 .....	( 7 )
1.1.4 威尔逊旋回和高原隆升 .....	( 10 )
1.2 地球气候史 .....	( 11 )
1.2.1 古生代与中生代 .....	( 11 )
1.2.2 第三纪 .....	( 13 )
1.2.3 第四纪 .....	( 14 )
1.2.4 全新世 .....	( 17 )
1.3 冰期—间冰期旋回 .....	( 19 )
1.3.1 旋回的证据 .....	( 19 )
1.3.2 地球轨道要素 .....	( 21 )
1.3.3 下一个冰期何时到来? .....	( 23 )
1.3.4 末次冰期冰盛期 .....	( 25 )
1.3.5 D/O 振荡与 H 事件 .....	( 27 )
1.3.6 冰期结束期 .....	( 29 )
1.4 气候与人类 .....	( 31 )
1.4.1 人类的出现 .....	( 31 )
1.4.2 走出非洲 .....	( 33 )
1.4.3 生活在冰期中 .....	( 35 )
1.4.4 走进全新世 .....	( 37 )
1.4.5 农业的起源 .....	( 38 )
1.4.6 气候与中国农业 .....	( 40 )
1.5 小结 .....	( 42 )
<b>第 2 章 全新世气候</b> .....	( 43 )
2.1 末次冰消期 .....	( 44 )
2.1.1 冰期结束期 .....	( 44 )
2.1.2 冰消期冰融水事件 .....	( 45 )
2.1.3 冰消期的 THC .....	( 47 )
2.1.4 冰消期气候变率 .....	( 49 )
2.1.5 冰消期的季风 .....	( 51 )

2.2	全新世大暖期	(54)
2.2.1	气候分期	(54)
2.2.2	大暖期	(56)
2.2.3	大暖期后	(59)
2.2.4	大暖期的模拟研究	(61)
2.2.5	中国的大暖期	(63)
2.3	早全新世气候湿润期	(66)
2.3.1	绿色的撒哈拉	(66)
2.3.2	从阿拉伯半岛到孟加拉湾	(68)
2.3.3	南美 ITCZ 的摆动	(69)
2.3.4	中国的湿润期	(70)
2.3.5	湿润期的模拟研究	(72)
2.3.6	岁差	(73)
2.4	全新世夏季风	(77)
2.4.1	全球季风的概念	(77)
2.4.2	东亚季风	(79)
2.4.3	南亚季风	(82)
2.4.4	非洲季风	(84)
2.4.5	美洲季风	(87)
2.4.6	澳洲季风与 ENSO	(88)
2.5	小结	(90)
<b>第3章</b>	<b>气候突变</b>	(92)
3.1	全新世气候突变	(93)
3.1.1	研究气候突变的现实意义	(93)
3.1.2	气候突变性	(94)
3.1.3	气候突变的成因分析	(97)
3.2	全新世北大西洋冷事件与快速气候变化	(98)
3.2.1	冷事件年代学	(98)
3.2.2	快速气候变化	(99)
3.2.3	冷事件与夏季风衰退	(103)
3.2.4	冷事件气候影响的模拟	(105)
3.3	早全新世冷事件	(106)
3.3.1	早全新世几次冷事件	(106)
3.3.2	8.2 ka 事件	(109)
3.4	中全新世冷事件	(112)
3.4.1	5.5 ka 事件	(112)
3.4.2	4.2 ka 事件	(114)
3.5	晚全新世冷事件	(117)
3.5.1	2.8 ka 事件	(117)
3.5.2	黑暗时代冷事件	(119)
3.5.3	中世纪暖期和小冰期	(122)
3.6	小结	(125)
<b>第4章</b>	<b>近千年气候变化</b>	(126)
4.1	近千年温度变化	(127)

4.1.1	全球平均温度序列 .....	(127)
4.1.2	中国平均温度序列 .....	(131)
4.1.3	中世纪暖期和小冰期的地域性 .....	(136)
4.2	夏季风降水变化 .....	(138)
4.2.1	印度夏季风 .....	(138)
4.2.2	非洲季风 .....	(141)
4.2.3	东亚季风 .....	(144)
4.2.4	ITCZ 变化 .....	(146)
4.3	史料揭示的中国气候变化 .....	(148)
4.3.1	研究历史 .....	(148)
4.3.2	夏季旱涝型 .....	(149)
4.3.3	中国的小冰期 .....	(152)
4.3.4	近 5 ka 气候变化 .....	(154)
4.4	中世纪气候异常 .....	(158)
4.4.1	气候变化型 .....	(158)
4.4.2	北美干旱 .....	(159)
4.4.3	欧洲的中世纪气候异常 .....	(161)
4.4.4	近 2 ka 中国的气候变化 .....	(163)
4.4.5	尼罗河洪水 .....	(165)
4.4.6	中世纪气候异常的模拟 .....	(166)
4.5	近千年的大气涛动 .....	(168)
4.5.1	大气涛动 .....	(168)
4.5.2	大气涛动指数 .....	(168)
4.5.3	20 世纪的四大涛动 .....	(171)
4.5.4	近千年的四大涛动 .....	(174)
4.6	小结 .....	(176)
4.7	附录 .....	(176)
<b>第 5 章</b>	<b>现代气候变暖 .....</b>	<b>(179)</b>
5.1	全球气候变暖 .....	(180)
5.1.1	研究历史 .....	(180)
5.1.2	现代全球温度序列 .....	(182)
5.1.3	气候变暖的观测事实 .....	(184)
5.1.4	归因分析与预估 .....	(185)
5.2	气候系统变化 .....	(187)
5.2.1	自由大气温度 .....	(187)
5.2.2	大气中的水 .....	(188)
5.2.3	冰冻圈 .....	(191)
5.2.4	海平面变化 .....	(193)
5.3	中国气候变化 .....	(194)
5.3.1	中国平均温度变化 .....	(194)
5.3.2	温度变化的时空结构 .....	(195)
5.3.3	中国温度的年代际变化 .....	(197)
5.3.4	中国平均降水量变化 .....	(197)
5.4	全球气候变暖的争议 .....	(202)
5.4.1	“曲棍球杆”之争 .....	(202)

5.4.2	近 10 年全球变暖的停滞	(204)
5.4.3	NIPCC 报告	(205)
5.4.4	太阳活动的影响	(206)
5.5	未来气候会变冷吗?	(208)
5.5.1	太阳活动减弱的证据	(208)
5.5.2	新的太阳活动极小期即将到来吗?	(210)
5.5.3	太阳活动极小期的寒冷气候	(211)
5.6	小结	(212)
<b>第 6 章</b>	<b>气候变化与古文明</b>	<b>(213)</b>
6.1	5 ka 的诺亚洪水	(214)
6.1.1	圣经中的大洪水	(215)
6.1.2	泥版中的大洪水	(215)
6.1.3	洪水发生的时间	(216)
6.1.4	洪水的古气候证据	(217)
6.1.5	诺亚方舟	(218)
6.2	4 ka 气候突变与世界古文明的衰落	(219)
6.2.1	尼罗河古文明的衰落	(219)
6.2.2	两河流域古文明的衰落	(220)
6.2.3	印度河古文明的衰落	(221)
6.2.4	中华古文明的更替	(222)
6.3	中国五帝时代(6~4 ka)的气候	(224)
6.3.1	五帝时代	(224)
6.3.2	考古与历史证据	(225)
6.3.3	古气候证据	(226)
6.4	4 ka 气候突变与中华古文明	(227)
6.4.1	新石器时代气候的考古证据	(228)
6.4.2	中华古文明的诞生与气候突变	(228)
6.4.3	洪水的历史记载与古环境证据	(229)
6.4.4	气候变干的古气候、古环境与考古证据	(229)
6.5	中国夏商周三代(4—2 ka)的干旱	(230)
6.5.1	干旱的史料	(231)
6.5.2	干旱的古环境证据	(232)
6.5.3	东亚夏季风的减弱	(234)
6.5.4	干旱的模拟研究	(234)
6.6	近 4 ka 气候变化与人类社会	(235)
6.6.1	近 2500 年欧洲气候变化与人类脆弱性	(235)
6.6.2	太阳活动影响	(237)
6.6.3	气候变化与中国的朝代交替	(239)
6.7	小结	(244)
6.8	附录	(244)
6.8.1	图 6.16 资料来源	(244)
6.8.2	古历史文献	(246)
<b>参考文献</b>		<b>(247)</b>
<b>关键词索引</b>		<b>(279)</b>
<b>后记</b>		<b>(282)</b>

## 第 1 章 地球气候简史<sup>①</sup>



<sup>①</sup> 本页的图取自 *PAGES News*, 1999(3), 封面。图的背景是俄罗斯在南极的东方站, 图中曲线自上而下分别为 CO<sub>2</sub>(二氧化碳), 温度, CH<sub>4</sub>(甲烷), 显示出近 42 万年来明显的 10 万年周期以及千年尺度气候振荡。

地球有 46 亿年(4.6 Ga, Ga 为 10 亿年, 或 4600 Ma, Ma 为百万年, 距今百万年即 MaBP, 现在习惯省略 BP) 的历史, 全新世不过 1 万年(10 kaBP, ka 为千年, 距 AD1950 千年即 kaBP, 现在习惯省略 BP) 左右, 从时间上讲全新世只占地球历史的 46 万分之一。然而, 这 1 万年正是人类发展, 进入文明社会的重要时期。这 1 万年的气候史与社会发展、科学的进步有着密切的关系。因此, 详细研究这段时间的气候史是气候学的一个重要任务。然而, 如果对过去 4.6 Ga 的气候史没有一个概括的认识, 是无法正确评价全新世的气候条件、也无助于对未来气候变化的预测。所以, 在当前气候变暖已成为国际关注的热门问题时, 古气候的研究也蓬勃地发展起来。由于我们的最终目的是研究近万余年全新世的气候, 所以只用第 1 章分析全新世之前的气候变化, 从份量上讲只占全书的六分之一。

## 1.1 地球的变化

然而, 在这一章中我们也不可能按历史时间平均地讲述各段时间的气候, 这不仅因为早期的资料十分稀少, 也因为越接近我们所要重点研究的全新世, 对我们也就具有更重要的意义。所以, 在这一章中仍然是采用厚今薄古的原则, 远古讲得笼统, 时间越近就讲得越来越细。所以在这种情况下, 只用这一节讲述地球的历史。

### 1.1.1 地球史年代学

地球的 4.6 Ga 历史可以分为两个大的阶段; 隐生宙(Cryptozoic Eon)与显生宙(Phanerozoic Eon), 宙(Eon)是划分地球史的最大单位。540 Ma 之前为隐生宙, 从 540 Ma“生命大爆炸”开始为显生宙。以前把寒武纪之前称为前寒武纪, 1977 年国际地层委员会前寒武纪地层分会在开普敦第四次会议上, 把前寒武纪分为太古代(Archean Era)及元古代(Proterozoic Era), 分界线在 250 Ma, 现代已很少使用前寒武纪这个名字了。太古代是最古老的地质年代, 保留下来的可靠化石非常少, 所以又把太古代早期岩石还没有形成的时期划为冥古代(Hadean Era), 即, 地球形成时期。这时地球上没有任何生命, 也没有水和土壤, 其下限即从 3.8 Ga 海洋的出现为标志。自此以后, 生物不断进步, 到 540 Ma 寒武纪发生“生命大爆炸”。所以, 地质学上把地球历史分为两个宙、六个代。前三个代为隐生宙, 后三个代为显生宙。代之下为纪, 纪之下为世, 表 1.1 给出地球历史的地质年代简表。

表 1.1 地球历史的地质年代简表(Saltzman, 2002, 本文作者有补充)

代(Era)	纪(Period)	世(Epoch)	距今百万年(Ma)	生物
新生代(Cenozoic)	第四纪(Quaternary)	全新世(Holocene)	0.01—	哺乳动物 被子植物
		更新世(Pleistocene)	1.8—0.01	
	第三纪(Tertiary)	上新世(Pliocene)	5—1.8	
		中新世(Miocene)	24—5	
		渐新世(Oligocene)	38—24	
		始新世(Eocene)	55—38	
古新世(Paleocene)	65—55			
中生代(Mesozoic)	白垩纪(Cretaceous)		144—65 E <sub>5</sub>	爬行动物 裸子植物
	侏罗纪(Jurassic)		200—144	
	三叠纪(Triassic)		250—200 E <sub>4</sub>	
古生代(Paleozoic)	二叠纪(Permian)		285—250 E <sub>3</sub>	两栖动物、蕨类
	石炭纪(Carboniferous)		360—285	
	泥盆纪(Devonian)		410—360 E <sub>2</sub>	笔石藻类
	志留纪(Silurian)		440—410	
	奥陶纪(Ordovician)		505—440 E <sub>1</sub>	
寒武纪(Cambrian)		540—505	三叶虫藻类	
元古代(Proterozoic)			2500—540	多细胞动物藻类
太古代(Archean)			3800—2500	出现生物
冥古代(Hadean)			4600—3800	无生命现象

现代大家公认第四纪开始于 2.6 Ma 之前,而不是 1.8 Ma. 但是为了与图 1.3 保持一致我们没有更动表 1.1 中第四纪开始的时间。显然在整个地球的历史中显生宙只占 12%,而隐生宙占 88%。对显生宙的研究离不开一个重要的问题,就是大陆漂移。说到大陆漂移,先要说大陆。地球开始形成时是没有大陆的,Saltzman(2002)曾引用 Kuhn 等(1989)的工作,指出大约从 4.0 Ga 开始出现大陆。以后陆地面积逐渐增加,两次比较激烈的增长出现在 3 Ga 及 1 Ga(图 1.1)。有了大陆才谈得上大陆漂移,所以大陆漂移主要是近 600 Ma 即将进入显生宙以来的事。图 1.2 给出显生宙中的八个时期的大陆分布。最早的是寒武纪(515 Ma)。至少在中奥陶纪,那时所有的大陆,波罗的海(Baltica)、劳伦泰(Laurentia)、西伯利亚(Siberia)、中国(China)、哈萨克斯坦(Kazakhstan)、以及广大的冈瓦纳(Gondwana)大陆,均处于接近赤道的位置,两极地区为海洋。志留纪中期(425 Ma)冈瓦纳大陆漂移到南极,但北极仍为开阔的海洋。石炭纪早期(360 Ma)西伯利亚移到了接近北极的位置。劳伦泰与波罗的海板块合并成新的劳亚大陆,开始与其南方的冈瓦纳大陆碰撞。碰撞切断了热带的海洋通道,在古生代末期及三叠纪初(240 Ma)形成联合大陆(Pangea),在大陆东边形成一个接近闭合环的特底斯海(Tethys Sea),其余的大面积海洋形成泛大洋(Panthalassic Ocean)。过去 200 Ma 一个特点就是冈瓦纳大陆分裂成现代大陆的形状。这包括在早白垩纪(100 Ma)冈瓦纳分成几片,北部板块分裂出劳拉细亚(Laurasia)。以后在始新世中期从欧—亚—非大陆分裂出北美及南美,形成大西洋。在整个新生代逐步确定了现代大陆的分布格局。在这个时期之初印度就完成了与亚洲大陆连接。始新世澳大利亚开始从南极大陆分裂出来,大约在 30 Ma 前后建立了环绕南极的洋流。从第三纪晚期至今,仍然有一些其他的变化,最主要的是 10~3.5 Ma 穿过巴拿马的海路的关闭,形成分隔大西洋与太平洋的地峡,以及西西伯利亚海路的关闭,阻止了海水流向北冰洋。

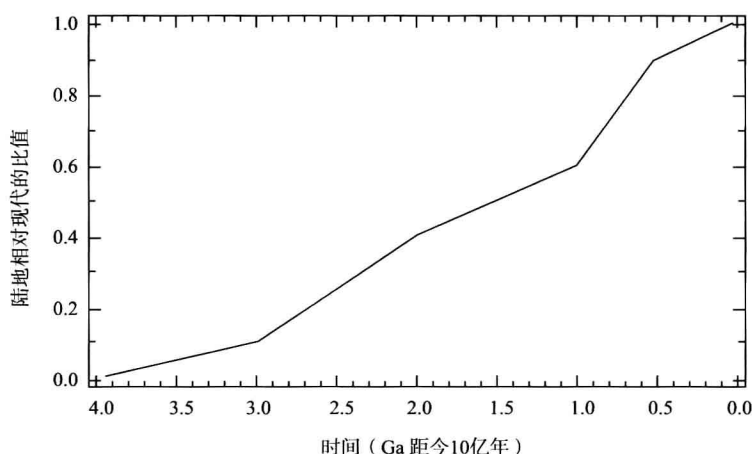


图 1.1 4 Ga 以来陆地与现代陆地比值(原作 Kuhn, *et al.* 1989, 取自 Saltzman, 2002)

### 1.1.2 冰河时代、雪球

有了这个海陆分布的基本概念,就可以扼要地讨论地球气候变化的历史了(图 1.3)。Saltzman (2002)指出地球历史上有 4 次大的冰河时代(Ice Age Epoch),为了与冰期—间冰期旋回区别,有时也称大冰期(Glaciation):

- (1) 元古代晚期 750 Ma~600 Ma。
- (2) 奥陶纪末 460 Ma,那时冈瓦纳大陆在南极,部分地区(现代的北非撒哈拉)形成冰河时代。
- (3) 石炭纪末到二叠纪初,约 300 Ma 在那时形成潘基亚泛大陆的冈瓦纳部分有广泛的冰盖,现在这一部分大陆即南美、南非、澳大利亚、印度及南极洲。
- (4) 在过去 50 Ma 逐渐冷却极冰开始增长。上新世中期温度下降激烈,在过去大约 2.6 Ma 形成强的冰河时代。

冰河时代中,地球两极形成冰盖并充分发育,两极冰盖大范围扩展至中低纬度(30°以内),甚至有学者怀疑地球在冰河时代中有可能被全部冰封,因此也被称为“冰雪地球(Snowball Earth)”,或简称雪



球(胡永云、闻新宇,2005)。这个概念最早在 1960s—1970s 提出,当时是出于能量平衡模式的非线性反馈测试,人们认为地球有可能全部冰封(Kirschvink,1992)。1992 年 Kirschvink 最早提出冰雪地球的概念(Kirschvink,1992),强调了低纬度在新元古代可能被完全冰封。2000 年前后,哈佛大学的 Hoffman 等连续发表文章(Hoffman and Schrag,2000;Schrag,2001)佐证冰雪地球在地球历史上的存在,冰雪地球的研究遂成为古气候学界的热点之一。

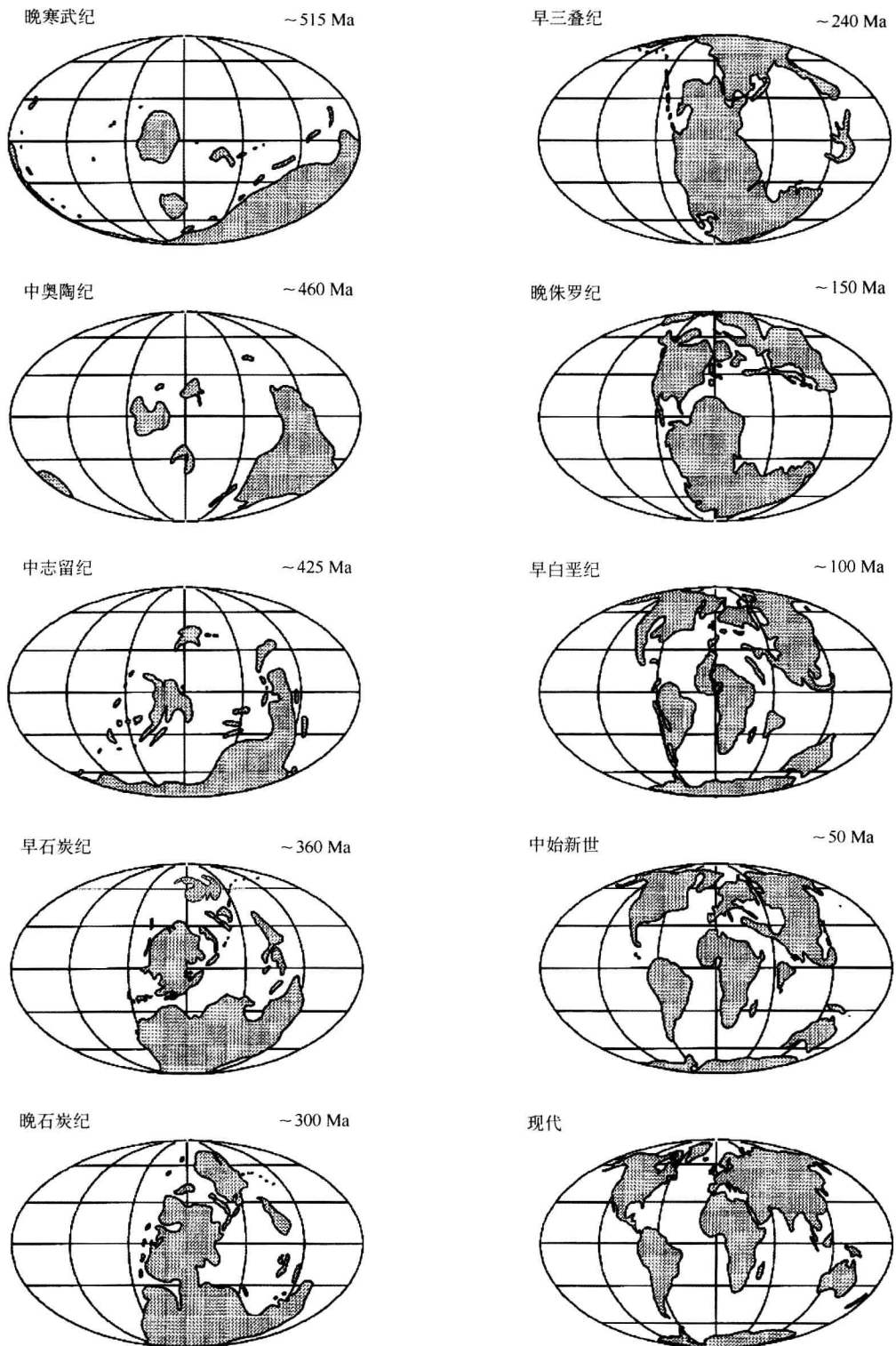


图 1.2 过去 500 Ma 海陆分布示意图(原作 Scotese,1997,取自 Saltzman,2002)